中華農業研究（Jour. Agric. Res. China）41(1)：90～114（1992）

溫室環境模式之研究
II. 模式驗證與應用[1]

陳加忠　賴建洲[2]　陳志昇[3]　黃照明[2]

摘要：爲驗證溫室環境模式之準確性與通用性，在此研究中量測兩型溫室在各種環境狀況下的微氣候數據，由於不同文獻之參數值有顯著差異性，少數部份數據用以修正模式之參數值，多數之量測值用以驗證模式的預測能力，模式對溫度預測的準確性約2°C，相對濕度值的預測誤差小於5%，模式的時間不相關性假設條件對兩型溫室均可成立，利用敏感性分析對於參數值進行模擬試驗，其結果顯示遮蔭裝置爲國內溫室作業必須具有的設備，利用蒸發冷卻法之降溫能力取決於進入溫室內太陽能量，外在空氣之相對溫度值與所用設備之作業效率，以自然通風或機械通風之溫室的降溫極限在於大氣之乾球溫度，利用蒸發冷卻法之降溫效果無法低於大氣濕球溫度。

關鍵詞：溫室，模式驗證

溫室栽培之主要特點在於其能夠提供保護植物生長的環境，使其克服如強風、暴雨，高日照、低溫……等逆境因子，在溫室栽培作業中，環境控制是提高產量，均一品質的重要方法，而其控制成敗之主要關鍵在於環境模式的建立。

環境模式之適用性在於其預測能力的準確性與其通用性。預測能力係指由外在環境因子（日照量、溫度、濕度，風向與風速等）之特定條件改變時，因溫室本身結構，覆蓋材料，內部植物，環控設備作業方式等特殊參數值所影響，藉由模式可預測溫室內部的溫度和濕度值。由於此預測能力，可用以規畫溫室條件和環控設備配合作業下所能維持的溫室內部環境。模式之通用性係指此模式在應用於不同地區或不同型式之溫室時，僅需調整參數值即可適用。

國內溫室所面臨的主要問題在於夏日強烈日照量引起之熱累積與冬日寒流來襲之急速降溫，環境模式則可用以規畫各型降溫方式之環控能力和評估加熱裝置之作業能源需求。適用本省之溫室環境模式已依熱傳與質傳原理加以建立（陳等人[3]），在此研究中，依據此模式進行驗證與應用之研究，其主要目的如下：

㈠利用兩型溫室以驗證模式預測能力之準確性。

㈡探討穩定狀況（Steady-state）假設之合理性。

㈢進行敏感度分析，探討各環控設備之作業性能。

㈣以模式探討各種環控設備之降溫性能。

文獻探討

1. 臺灣省農業試驗所　研究報告第 1612 號。
2. 本所農業工程系副研究員、助理研究員、計畫助理。
3. 本所農場管理室助理。

爲建立適用國內溫室之環境模式，陳等人[3]之研究中，利用熱、質平衡原理所推導之模式描述如下：

(一)熱傳模式

$$\pm Q_e + \tau_e \cdot I \text{、} A_f = U \cdot A_w \cdot [T_l - T_o] + \rho C_p \cdot M' (T_l - T_e) +$$
$$\varepsilon_s \ \tau_t \ A_f \ \alpha \ [T_{lk}^4 - \varepsilon_a \ T_{ok}^4] + GE \cdot A_f +$$
$$0.252 \cdot P_f \cdot A_f \cdot QI \cdot (0.8 + 0.00T_l) \quad \cdots\cdots (1)$$

符號說明：

A_f：溫室地面面積（m^2）

A_w：溫室周壁面積（m^2）

Q_e：機械設備所增加或減少之熱能（w）

τ_e：太陽能穿透入溫室之有效利用比例常數。

I：日照量（w/m^2）

U：周壁熱傳係數（$w/m^2 \cdot k$）

ρ：空氣密度（kg/m^3）

C_p：空氣比容（J/kg.k）

M'：通風量（m^3/sec）

ε_s：平均穿透率（0.85）

τ_t：長波輻射熱傳係數

α：波茲曼常數

ε_a：穿透係數

GE：地面熱流量（w/m^2）

P_f：溫室內地面種植植物比例

Q_I：太陽能進入溫室內之有效能量（$Q_I = \tau_e \cdot I \cdot A_f$）

T_l：溫室內空氣溫度（°C）

T_{lk}：溫室內空氣溫度（°k）

T_o：大氣溫度（°C）

T_{ok}：大氣溫度（°k）

T_e：通風作業時之空氣溫度（°C）

(二)質傳模式

$$H_l = H_o + W_e / \rho \quad \cdots\cdots (2)$$

符號說明：

H_l：溫室空氣之絕對濕度值（kg of H_2o/kg of air）

H_o：大氣之絕對濕度值（kg of H2o/kg of air）

ρ：空氣密度（kg/m^2）

W_e：機械設備加入之單位水份（kg of H_2o/m^3）

在模式驗證中，參數數值（如牆壁熱傳係數，土壤之熱能吸收率……等）之選擇主要是利用已知之文獻數據[7,8,9,10]。而參數之適用值對預測性能之影響在敏感度分析（Sensitive Analysis）時再加以探討，由於參數值對預測性能之影響性不能忽視，因此 Albright 等人[5]利用線性迴歸技術自收集之量測數據以估求參數數值。Udink Ter Cate[13]曾報導利用數據之適稱性（Fitting of the data）以求得參數值，但未說明其方法。Jones 等人[12]則將量測之數據分成兩類，一爲參數校下用數據，另一組爲驗證用數據。將模式之參數以第一組數據校正改良其準確性，再以第二組數據評估其預測能

力。

模式之準確性程度依研究者之報導有所不同，溫度之準確度於 2 °C以內，相對濕度則在10%之內(4,7,8,9,10,12)

材料與方法：

一、驗證用溫室

在此研究中所利用以進行環境模式驗證用溫室有兩型，皆位於本省中部農業試驗所內，其主要結構如圖1，2所示。

1. 山型溫室（Gable-Roof Greenhouse）

此型溫室覆蓋材料爲單層塑膠布（PVC），具有兩側捲起裝置，屋頂爲太子樓式，可進行自然通風作業。在機械通風作業設備上具有大風扇一具，小風扇四具，以進行不同風量之通風研究。

屋頂之外裝置50%遮蔭率之遮蔭網，可控制開閉位置，其位置係與屋頂之斜度平行，在太子樓頂亦裝設遮蔭網，使溫室遮蔭效果一致。地面舖設碎石，其種植作物爲盆栽觀賞植物，其數量約占地面面積35%；此溫室之長爲12m，寬6m，高爲2.8m，屋頂之斜度角爲23.4°，屋頂與四壁之總面積爲260m²，體積約248m³。其座落方向爲東西向。

2. 半圓隧道型溫室（Semi-tunnel Greenhouse）

此雙層塑膠布溫室之主要目的在於實驗其集熱能力以研究應用於水果加工乾燥之可行性，在此以其微氣候數據做爲驗證環境模式之用。其外形爲半圓隧道型（圖2），材料爲 PVC，地面面積18m²（3×6m），牆壁面積76m²，體積爲43.6m³。雙層塑膠布之間隙爲8～10mm。

爲增加集熱效果，地面舖設黑色塑膠布，其座落方向爲東西向。進行模式驗證時，溫室內未置乾燥試驗用樣本。

圖1. 山型塑膠布溫室

Fig 1. Gable-type plastic greenhouse

圖2. 雙層塑膠布溫室
Fig 2. Double-layer plastic greenhouse

二、微氣候量測設備

此研究中所量測之氣候因子如下：日射能，溫度與相對濕度。

溫度與相對濕度係利用 Rotronic Hygromer I-100 Transmitter，其溫度感測元件爲 RTD PT—100ohm，誤差值爲0.1°C，濕度感測元件爲 Rotronic Hygromer C—83—N，其作用原理在於利用薄膜型電容元件與濕度之關係轉換成電壓訊號輸出，其溫度與相對濕度之輸出訊號範圍於 0 — 1 V 之間。相對濕度之準確度約 2 — 3 %，經校正改良後可調整爲0.7%。

日照能量利用 Eppley Radiometer（Model 8—48）量測，其製造廠商爲 Eppley Lab. INC，其校正係利用 Eppley of Reference Standard，其輸出值爲 mv，範圍於 0～10mv 之間，誤差約爲3%，爲避免雜訊干擾此微弱電壓訊號造成失眞，在量測時利用電壓放大器放大50倍，其輸出訊號再依原廠之校正公式換算爲日照能量（w/m^2）。

感測器之設置地點如下：三具 Rotronic I—100型溫濕度計分別放於兩型溫室和大氣中，皆具有覆蓋（Shield device）保護裝置以避免陽光直射引起誤差。溫室中感測器之位置位於對角線中間位置高度1.2m 處，一具日照計置於外界以量測日照直射能，另一具輪換置於兩型溫室之中，用於量測溫室內部之日照直射能量。

由於兩種感測器之輸出訊號各爲電壓值，以電壓記錄器（Ling-Shyh 型，Ls—ELR—48 Model）直接記錄以供分析。

三、參數數值之選擇

不同文獻所列舉之參數值並不相同，例如以塑膠布溫室而言，單層之 U_k 值在 ASAE 標準爲6.8 $w/m^2.k$，日本之標準值爲6.5[5]。此外，各種參數值往往受到使用時間材料老化之影響，因此必須作現地之調整校正。詳細之現地校正方法另篇加以討論。

四、模式之驗證

模式驗證必須包括不同時間（Temporal）與不同地區（Spatial）之預測準確性比較，爲避免模式之建立只是數組數據自身之自我歸納分析，此研究中將驗證所用數據與模式參數校正用數據彼此獨立（Independent）。其驗證方法描述如下：

1. 以文獻所得之參數值代入環境模式，以此數據由模式執行得到預測值，並與實際量測值（參數調整用數據）比較。
2. 調整（Adjusted）參數值，使預測值儘可能接近量測值。
3. 以所得參數值代入模式，以模擬計算所得之預測值，與驗證所用量測值比較，用以驗證模式對於各不同時期之預測能力。
4. 以相同(1)～(3)之方法驗證與比較在不同地區或不同型式之溫室其模式通用性。

模式之預測準確度其檢驗方式在定性標準方面可以以預測誤差值對量測值或時間之殘差圖加以觀察是否其有規律性分佈。在定量比較可利用平均誤差值（D_a）加以比較：

$$D_a=\frac{\Sigma|Y-\hat{Y}|}{N} \qquad (3)$$

$Y, \hat{Y}$ 爲量測值與預測值，N 爲數據之數目。

結果與討論

一、參數選擇值

模式參數值中，太陽能所能利用值決定了溫室內主要之熱量來源。在此實驗中以兩具日照計分別量測溫室內外日照直射能（S_I, S_o），因此日照能量利用常數 τ 值可計算爲：

$$\tau=s_I/s_o \qquad (4)$$

溫室內直射能量與淨所得能量有常數關係存在，利用參數調整用數據加以比較，α 值約爲1.1，此與日人掘部和雄[15]之研究結果相近。

以此方式所估求之之日照能有效利用率 τ_e 值如下：山型塑膠布溫室爲0.42，遮蔭後爲0.22，雙層塑膠布溫室爲0.64。

二、模式預測能力之驗證

(一)山型溫室

山型溫室於密閉狀況時其溫度量測值和模式預測值加以比較，以參數調整方式使差異值最小，其結果如圖3a所示。在最佳準確性情況下，此型溫室參數值如下：週壁熱傳係數（U_k）：6.3w/m²，週壁對流係數（H_v）：4.3w/m²，塑膠布太陽能穿透有效利用率（τ_e）：0.42，遮蔭後爲0.22。

由圖3a可知此型溫室在近乎密閉狀態其溫室效應使溫室內部空氣高於外界氣溫約10°C。由於溫室已有外遮蔭隔絕部份太陽能，而且因溫室兩側並非完全密閉，因此與頂層之太子樓形成自然對流，H_v 值約4.3w/m²，使溫室內熱累積效應並不十分嚴重。

山型溫室在自然通風狀態下，因內外溫差引起之自然對流通風效應，其示意圖如圖3b。由於溫室兩側加以打開，加上頂層爲開啓狀態，自然通風之效果使溫室用內部溫度僅大於外界氣溫約4°C，在適當的參數值校正後，自然通風排出係數（Discharge Coeff.），評估爲0.34。由圖3b可知其準確性十分良好，僅於8：30之預測值之誤差最大約爲2°C。

以圖3a、b驗證所得之參數值以校正地面熱流係數值 GE，在模式建立中已定義 GE 值由一特定時間前大氣日照量（I_s）和其增減趨勢以決定，由驗證數據以校正 GE 值，判斷依據爲1.5小時之前日照量（I_s）。

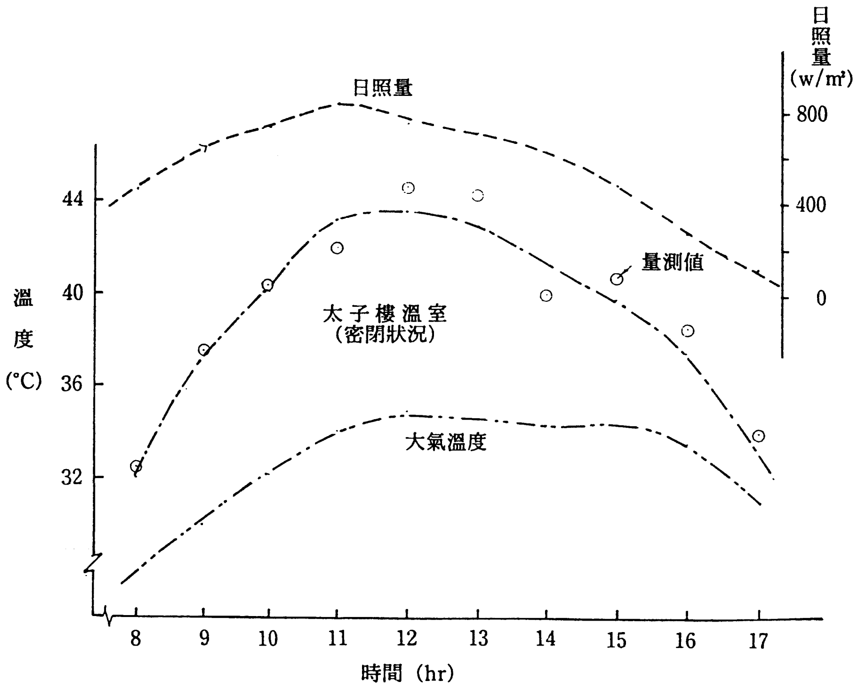

圖3a. 山型溫室環境模式驗證（密閉狀態）
Fig 3a. Verification of environmental model for gable-type greenhouse (Close system)

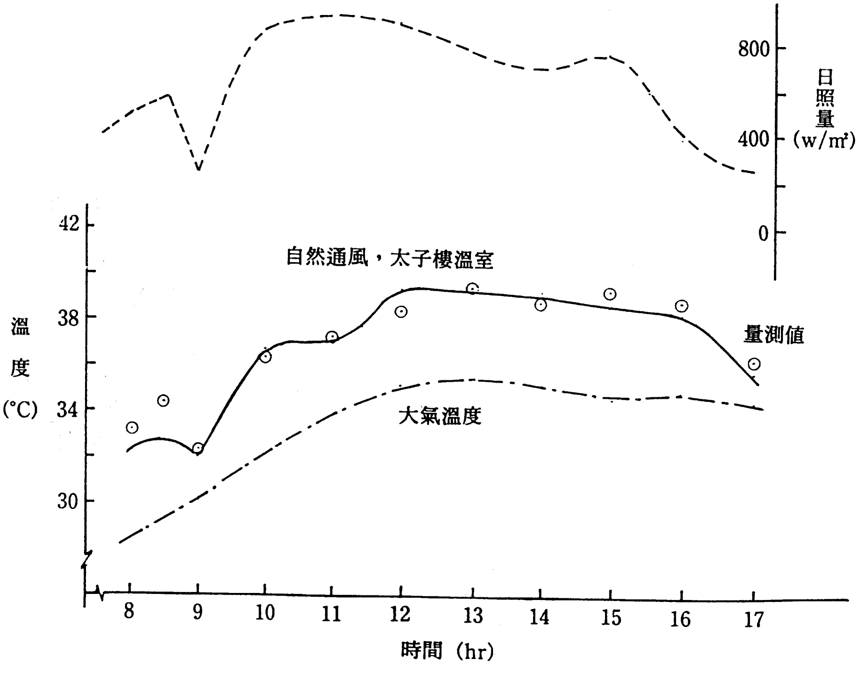

圖3b. 山型溫室環境模式驗證（自然通風狀態）
Fig 3b. Verification of environmental model for gable-type greenhouse (Natural ventilation)

1. I_s 增加時，I_s＞400w/m²，GE＝25w/m²

2. I_s 增加時，I_s＜400w/m²，GE＝15w/m²

3. I_s 減少時，I_s＞400w/m²，GE＝−35w/m²

4. I_s 減少時，I_s＜400w/m²，GE＝−15w/m²

以獨立於圖3a、b之量測數據，加以比較模式之預測能力，結果顯示預測能力十分良好。典型之圖形如圖3c，在量測當日中間間隔時期以機械通風，通風量每分鐘約爲0.6倍溫室體積，此溫室之外遮蔭裝置未加遮覆，有42%之日射能進入溫室內部，依未通風密閉狀態之預測性，其溫室效應將使室溫增加18°C左右，而由通風風扇未開啓時（8：30分至10：30分，15：30分至17：30分）之量測值與預測值比較可知其預測能力良好。在通風狀態，日射能並非穩定分佈，因此室溫亦有高低起伏分佈，圖3c中虛線之預測值曲線與量測值之符合性良好，平均誤差值（D_l）約爲1.5°C。

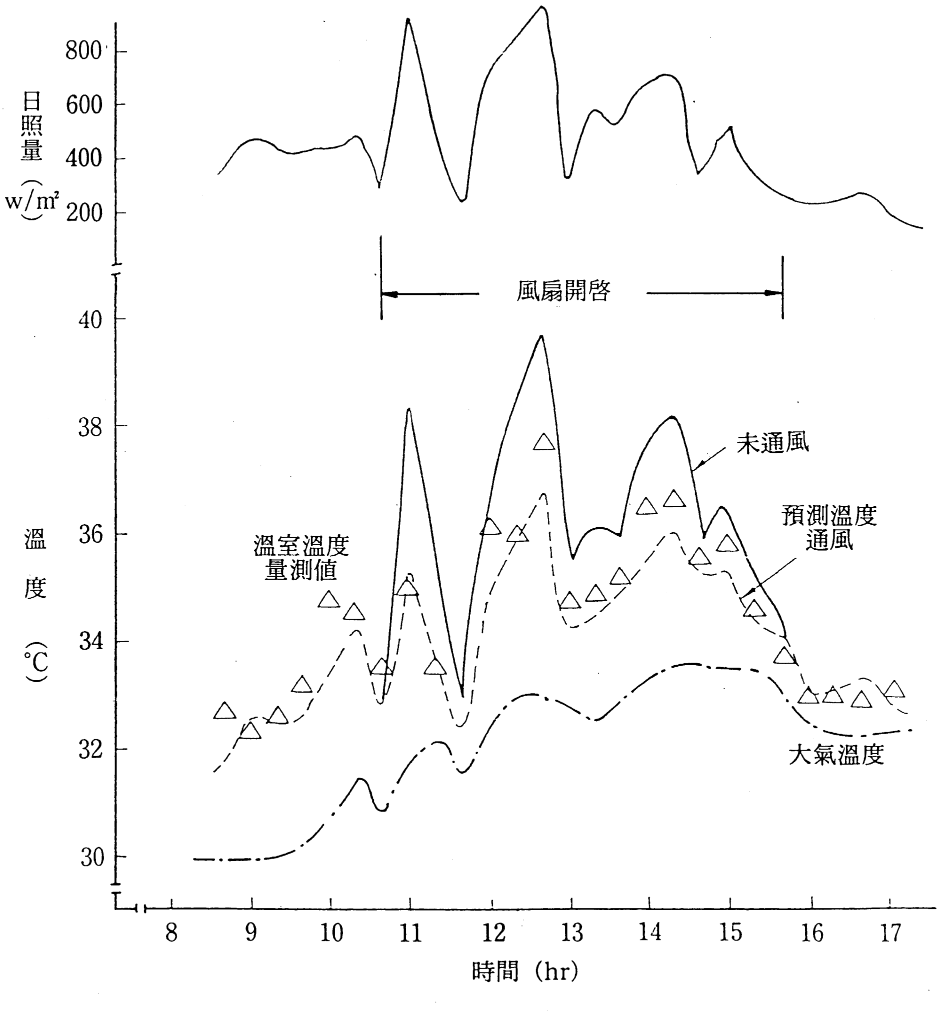

圖3c. 山型溫室環境模式驗證（機械通風）

Fig 3c. Verification of environmental model for gable-type greenhouse (Mechanical ventilation)

模式對溫度、濕度的預測能力比較圖亦於圖3d，3e。圖3d中，溫室遮蔭且兩側密閉，溫室效應使溫室內部增加約12°C，預測曲線能夠適當的描述此結果。溫室內相對濕度因加溫而降低，預測值曲線亦能反映其分佈趨勢，其平均誤差值爲3.0%，最大誤差值約爲5.0%。

圖3e中大氣日照量隨時間之分佈並不穩定，溫室爲外遮蔭與自然通風狀態，溫度之預測曲線與量測之差異均在1°C以內，相對濕度預測曲線之誤差量皆在2.5%之內，由此可知在日照量不穩定之大氣狀況下，模式仍具有良好的預測能力。

(二)雙層溫室

雙層溫室爲集熱需要，儘量使其密閉性良好，且無外遮蔭裝置，以驗證用量測數據配合環境模式加以校正參數值，其典型結果如圖4a。在最佳準確性之情況所得參數值：週壁傳導係數（U_k）：4.1w/m²，週壁對流係數（H_v）：0.12w/m²，而 τ_e 值爲0.64。由於其地面覆蓋黑色塑膠布以增加集熱能力，GE 值如下：

1. I_s 值增加且大於250w/m²，GE＝40w/m²
2. I_s 值增加且小於250w/m²，GE＝20w/m²
3. I_s 值減3且大於250w/m²，GE＝－50w/m²
4. I_s 值減3且小於250w/m²，GE＝－25w/m²

圖4a中量測值與預測值之平均誤差約2°C，溫室內溫度高於大氣溫度約30°C，顯示雙層塑膠布之良好集熱能力。

圖4b係利用與參數校正用數據不相關之量測數據加以驗證模式之預測能力，其溫室效應使室溫大於氣溫30°C左右。溫度預測曲線之平均誤差於1.5°C左右。相對濕度之平均預測誤差約3.0%。顯示此環境模式適用於雙塑膠布溫室之環境預測。

由上述兩型溫室內之環境量測值與模式預測值之比較可知已建立之環境模式有良好的預測能力，其溫度最大預測誤差不超過2.5°C，相對濕度之最大誤差不大於5.0%，因此此模式可做爲良好的模擬工具，用以進行溫室之合理化規畫，其部份應用方法討論於如下章節。

三、溫室內部地面水份之降溫效果

國內農民於溫室栽培作業中，爲在夏日進行降溫作業，已有利用植床底下開溝灌水，或在混凝土表面加以淹灌。實地調查結果顯示其降溫作用未有一定之效果。在此研究中，將山型溫室地面設置積水水池，模擬農民夏日地面之降溫作業方式，並以實測值與溫室未設置積水池之微氣候預測值以比較評估其降溫能力。

由微氣候量測結果可知，在無通風作業時，地面積水無降溫效果，此由圖5ａ中，在外遮蔭之條件下，自8：30分至10：30分之數據可知，量測值與預測值十分符合。在10：30分風扇開啓之後，實測值與預測值（地面未有積水之情況下溫室內部應有之溫度）。比較有低下之現象，其降溫效果約爲0.5～1.5°C之範圍，此原因可解釋爲地面水分之蒸發以潛熱方式帶走部份內部空氣之顯熱，而通風作用再將此熱源帶離溫室，達到降溫效果。

圖5b顯示在未遮蔭且通風良好的情況下，溫室地面所置水份對降溫之影響，虛線代表以模式所預測在地面未置水份時之溫度與濕度值。由溫度之實測值可知圖地面水汽之蒸發，其降溫效果約2～3°C，而在相對濕度之比較中，量測值均顯著高於預測值，顯示溫室內空氣因水蒸氣之加入使濕度值增加，其降溫效果在於強日照時有更多水份轉換成蒸氣。

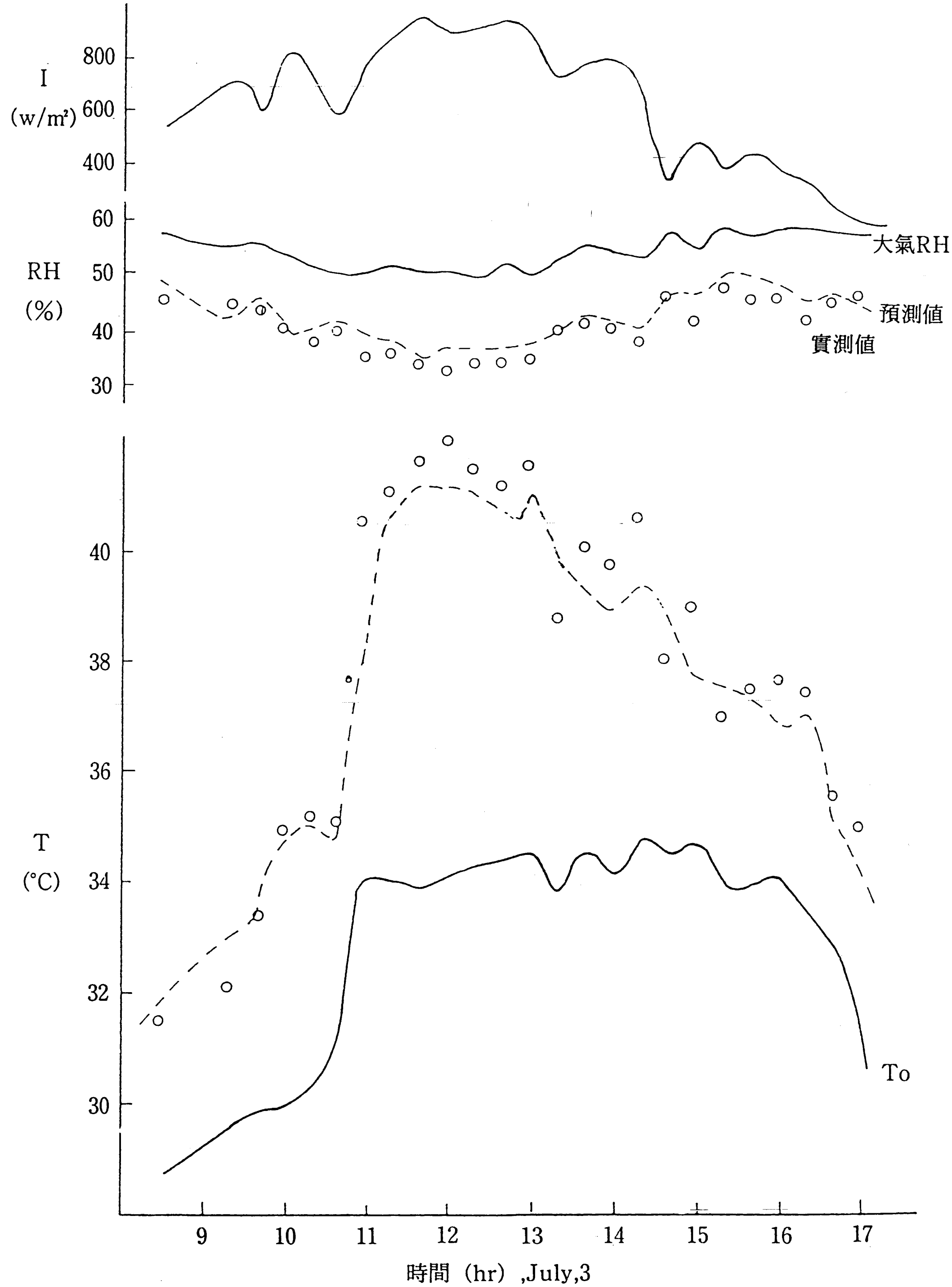

圖3d. 山型溫室環境模式驗證（密閉狀態、溫度、濕度）

Fig 3d. Verification of environmental model for gable-type greenhouse (Close system. Temp. RH)

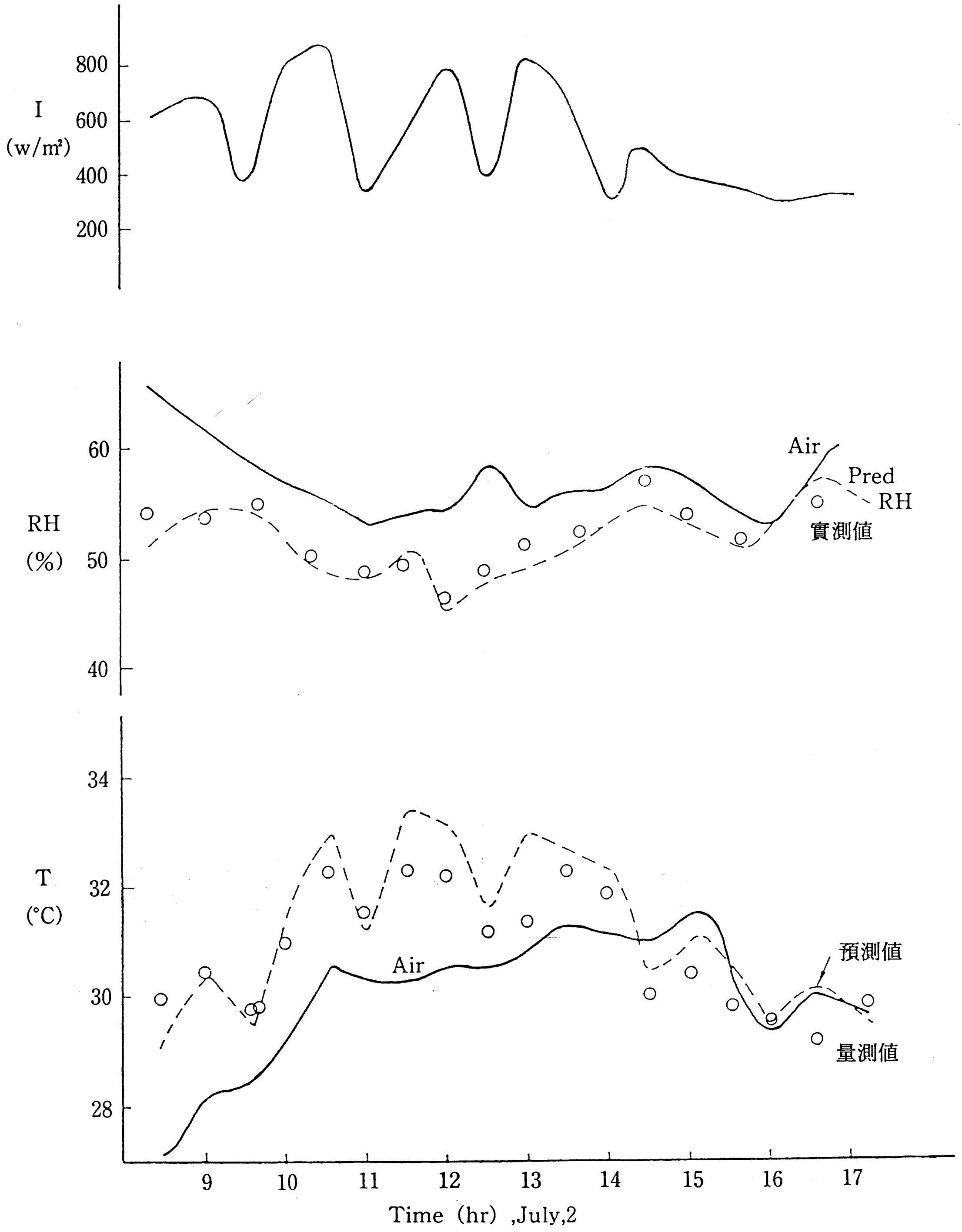

圖3e. 山型溫室環境模式驗證（自然通風、溫度、濕度）

Fig 3e. Verification of environmental model for gable-type greenhouse (Natural ventilation. Temp. RH)

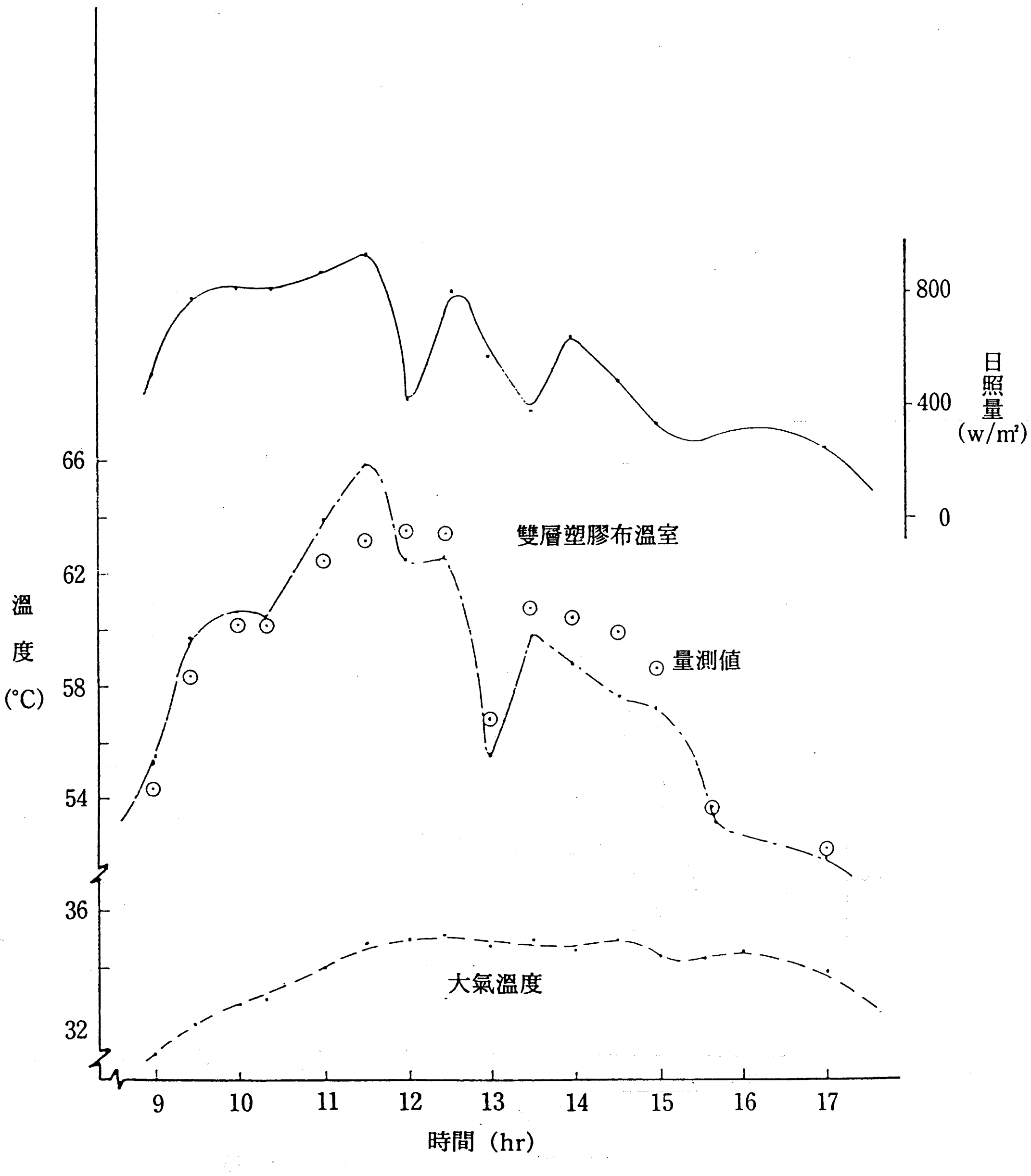

圖4a. 雙層溫室環境模式驗證（溫度）

Fig 4a. Verification of environmental model for double-layer greenhouse (Temp.)

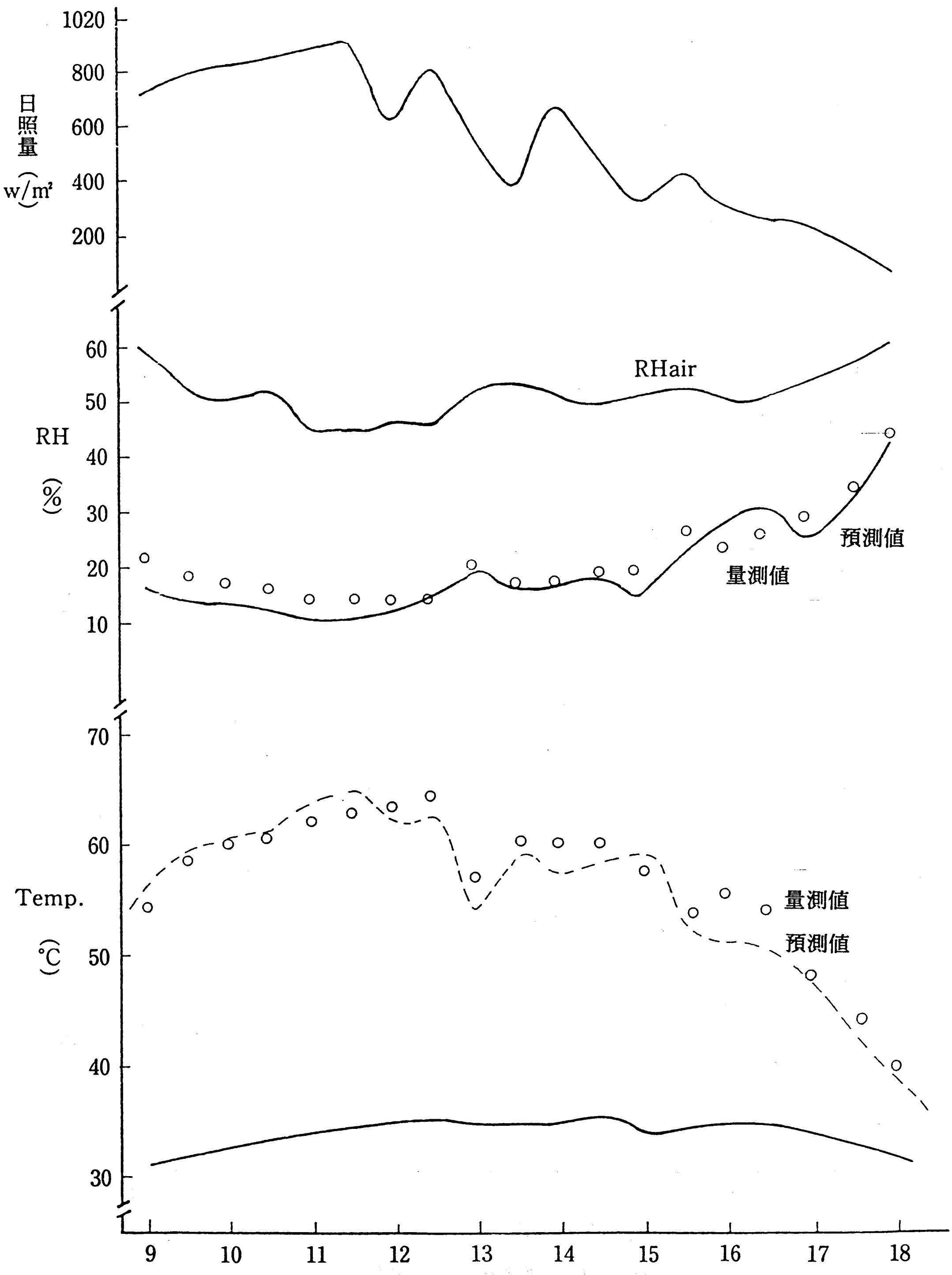

圖4b. 雙層溫室環境模式驗證（溫度與相對濕度）

Fig 4b. Verification of environmental model for double-layer greenhouse (Temp. and RH)

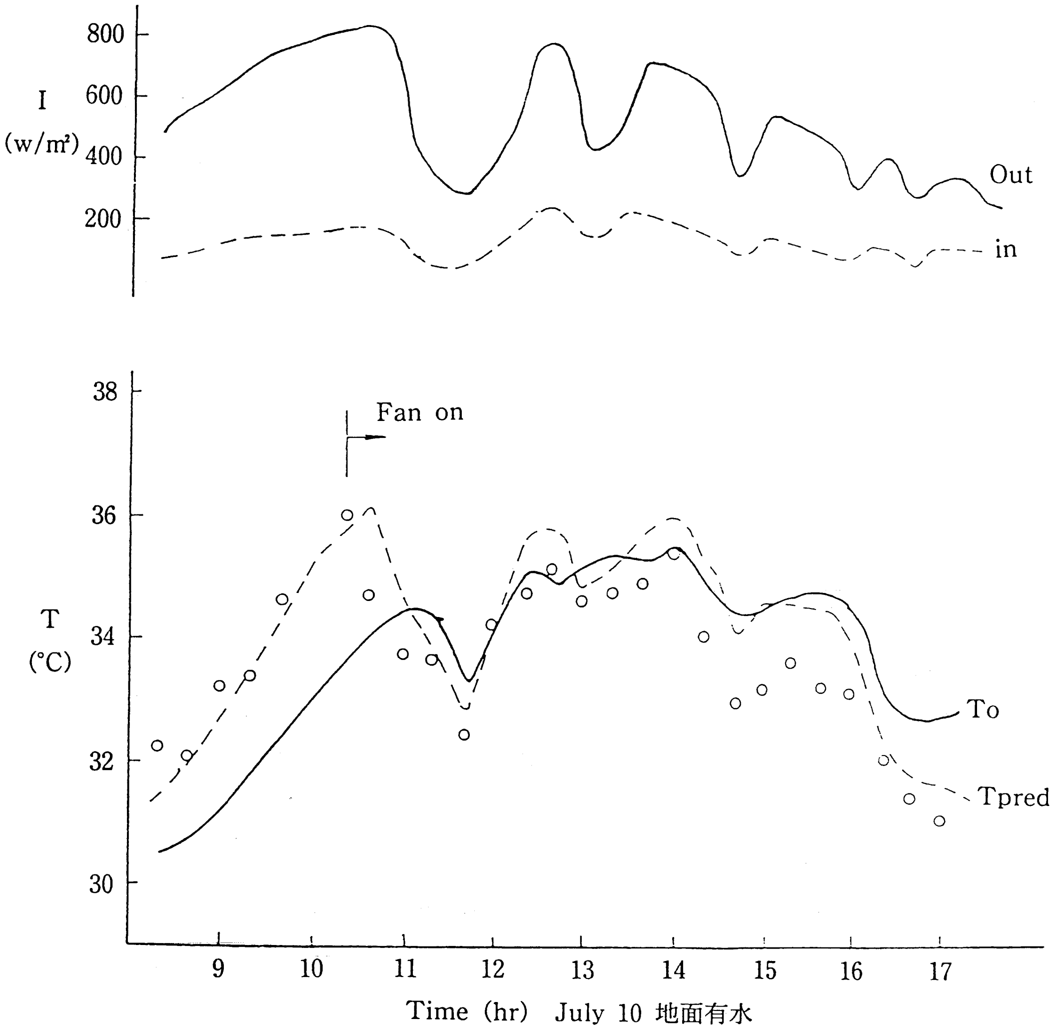

圖5a. 地面積水對溫室微氣候之影響（遮蔭）

Fig 5a. The effect of greenhouse microclimate for the accumulated water on the ground (Outside shading.)

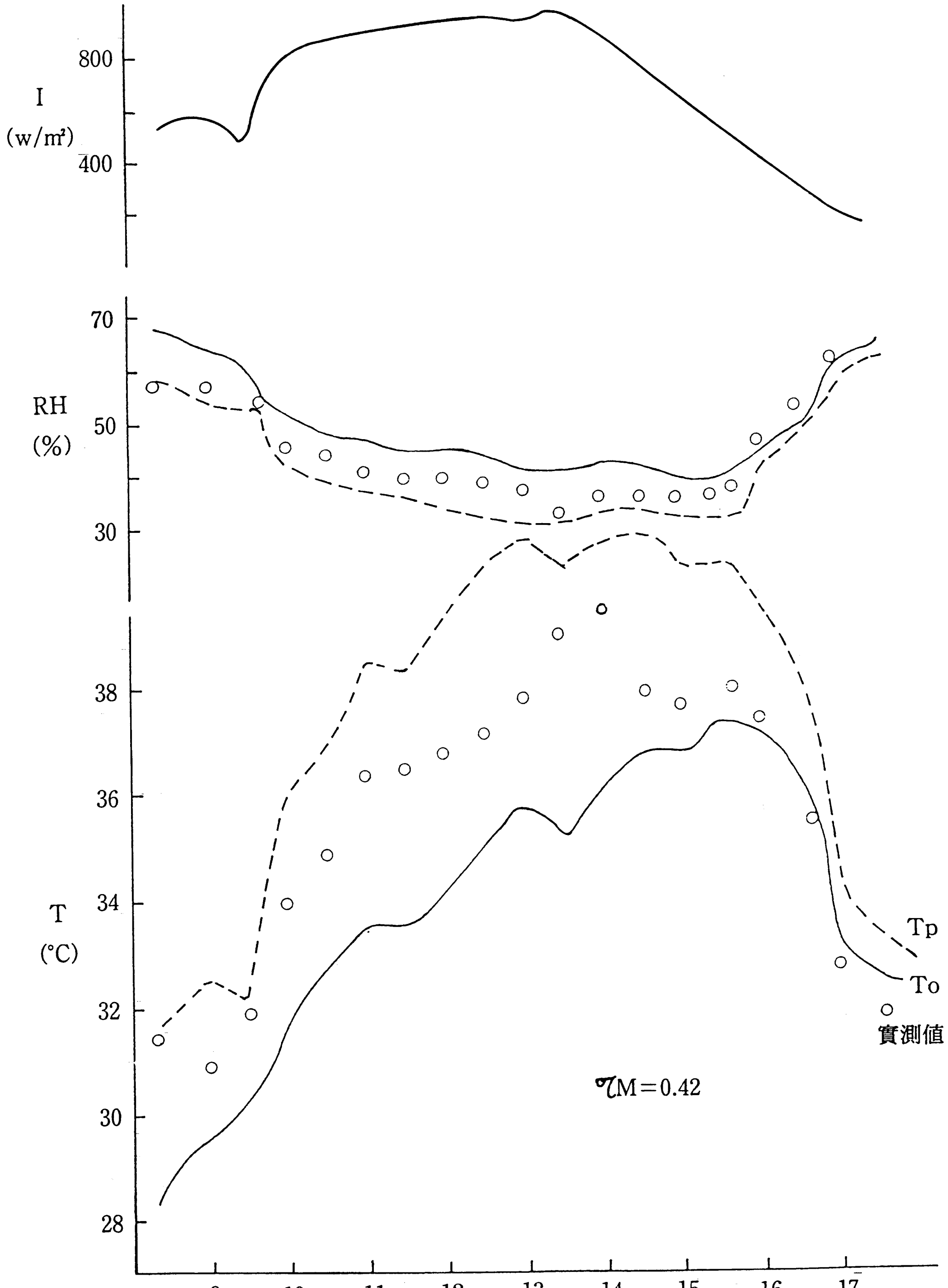

圖5b. 地面積水對溫室微氣候之影響（不遮蔭）

Fig 5b. The effect of greenhouse micro climate for the accumulated water on the ground (No shading.)

由上述結果可知，地面積水有部份降溫之效果，其效應爲蒸發冷卻之應用，但因此種效果僅在強日照且配合通風時才有降溫能力。對實際之降溫效果仍是有限。

由此種量測値與模式値之比較，可知良好之預測模式可用以爲溫室合理化規畫之用。

四、反應時間對模式預測性之影響

此環境模式之基本假設在於其時間不相關，爲外界環境之快速反應（Rapid response）結果，而土壤熱流量以一定値 GE 代表。爲檢驗此假設性是否合理，將模式之熱量傳遞模式假設爲時間相關用以討論其反應時間對預測値之影響。

在簡化分析作業中，溫室內長波熱幅射可合併於周壁熱傳導之項次[6,14]，植物呼吸作用所消耗之能量可自太陽能入射值有效能量項內扣除。

在考慮反應時間時，方程式(1)改寫如下，其符號與公式(1)相同，C_1 C_2 與 C_3 爲計算用常數，

$$\rho V_g C_a \frac{dT_I}{d_\theta} = [k_1 + k_2 T_o + k_3 T_e] - (k_2 + k_3) T_I \quad (5)$$

V_g＝溫室體積（m^2）

$$k_1 = \tau_e IA_f (1 - C_1 (C_2 + T_I)) \quad (6)$$

$$k_2 = (U_k + H_v) A_w + C_3 \quad (7)$$

$$k_3 = \rho M' C_p \quad (8)$$

公式(5)可改爲如下形式：

$$\frac{dT_I}{d_o} = A - BT_I \quad (9)$$

$$A = (k_1 + k_2 T_o + k_x T_e) / \rho Vg C_a \quad (10)$$

$$B = (k_2 + k_3) / \rho Vg Ca \quad (11)$$

對公式(9)而言，此一階微分方程式之初值條件：

$$\theta = 0, T_I = T_o \quad (12)$$

因此通解值爲

$$T_I = \frac{A}{B} + [T_o - \frac{A}{B}] e^{-Bt} \quad (13)$$

以山型塑膠布之參數條件和結構條件代入公式(13)，假設大氣環境之條件 $I = 730 w/m^2$, $T_o = 32.2$ °C, RH＝60%，其結果分析如下：

1. 在密閉狀態：

$$T_I = 42.84 - 10.64 \text{ Exp} [-1.03 \times 10^{-2} \cdot t] \quad (14)$$

2. 在自然通風狀態：

$$T_I = 35.84 - 3.64 \text{ Exp} [-1.82 \times 10^{-2} \cdot t] \quad (15)$$

3. 在機械通風狀態：

$$T_I = 33.06 - 0.84 \text{ Exp} [-7.8 \times 10^{-2} \cdot t] \quad (16)$$

可知在密閉狀態，其反應速率最爲緩慢，但以實際時間值代入計算，t＝1min, T_I＝37.1°C, t＝2min, T_I＝39.8°C, t＝5min, T_I＝42.4°C, t＝＝10min, T_I＝42.82°C，在時間趨於無限大時，T_I＝42.84°C，可知在密閉狀態反應時間5分鐘之後其誤差值在0.6°C之內，而以機械通風作業而言，公式(15)中，t＝1min時，Ti＝33.05°C，可知其反應速率極爲快速。

B值可用以代表溫室環境模式對外界大氣環境變化時反應之速率。B 值愈大代表反應時間愈快，d^T/d_θ 值之變化量愈小，愈能合乎變化時間不相關（Time-independent）的假設。由B值之公式

(11)，B 值增大的有利條件爲週壁熱傳導係數（U_k, H_v）增大，通風量（M_t）增加，溫室週壁面積（A_w）增大，而溫室體積（V）減少。

對荷蘭兩型溫室 Venlo 型與 Widespan 型而言[2]，在未有機械通風裝置僅利用自然通風以調整溫室內微氣候之情況下，B 值愈大代表與外界之環境反應愈快速，在未做環境控制之前即受外界影響，因此荷蘭溫室業者對溫室環控之要求即在於其對外界之變化反應越慢越良好，其環控設備係以天窗角度改變通風量加以調整以穩定內部環境。兩型溫室中 Wide-Span 型比 Venlo 型在同一地面面積下，體積增加33.3%，以公式(11)中B值而言，Wide-Span 之 B 值比 Venlo 型小，因此對環境反應愈遲緩，對以利用自然通風方式進行環控更爲有利，此結論可以說明溫室模式之應用性。

在連棟溫室中，其溫室總面積與體積之關係均不同於此研究所用單棟溫室，因此此型溫室內溫濕度在外界環境變化時其反應時間之影響必須另外加以量測驗證。

五、敏感度分析

模式經驗證以建立其預測能力後，其重要用途之一在於進行模擬以減少昂貴費時之多次重覆試驗。在進行模擬作業時變動單一項目數值而固定其他條件，以進行此變動參數的影響程度，此方式稱爲敏感度分析（Sensitivity Analysis）。

在此研究之敏感度分析作業中，以高日照量和低日照量兩種天氣狀況下進行比較。

(一)高日照量

典型高日照量之天氣狀況如圖6所示，日照量於上午時最強，數值均接近1000w/m²，相對濕度之分佈恰爲相反，下午時最低値約50%，而溫度以午後13：00至14：00時最高。

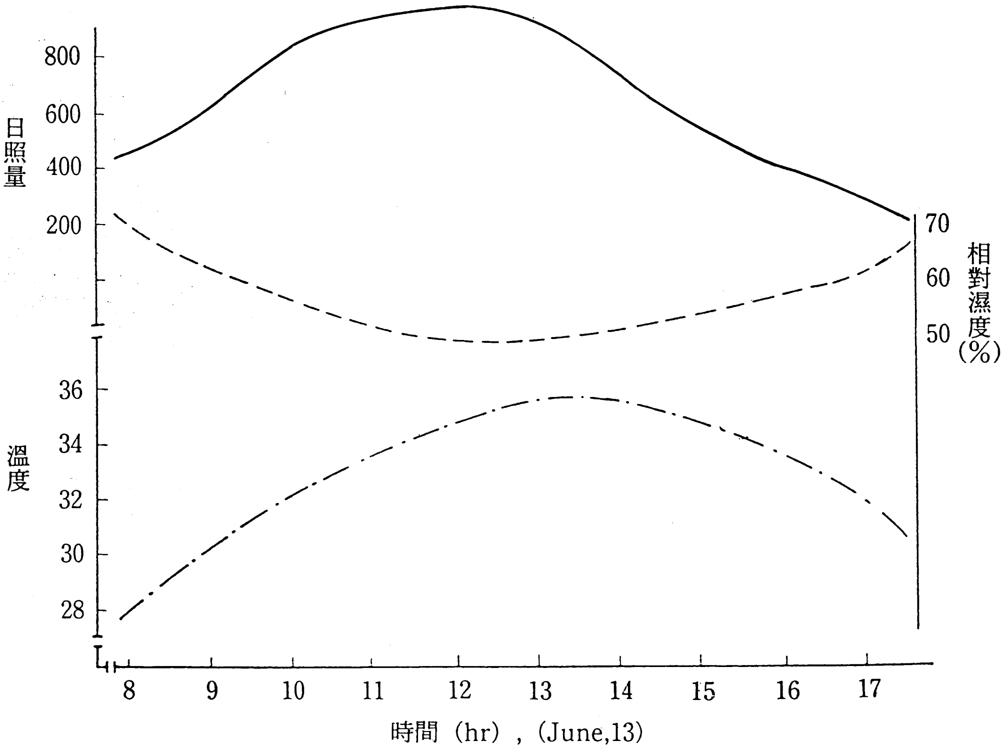

圖6. 典型之高日照量大氣環境

Fig 6. Typical air environment of high solar intensity

以山型溫室進行敏感性分析，不同的太陽能量穿透率對溫室內之影響如圖7所示。對一般塑膠布設施而言，其日照量有效穿透率（τ_e）在0.7～0.8之間，其產生之溫室效應極爲顯著，在τ_e＝0.7之條件，中午11：00至14：00時，溫室內溫度增加約20°C左右。而塑膠布在經年使用後因灰塵影響使穿透率遞減，在 τ_e＝0.4，溫室效應之影響使溫室內部溫度增加約10°C左右。若具有遮蔭設備使 τ_e 值僅爲0.2，最高之溫室效應值約爲4°C，可知在本省地區太陽能量之遮蔭作業十分重要。

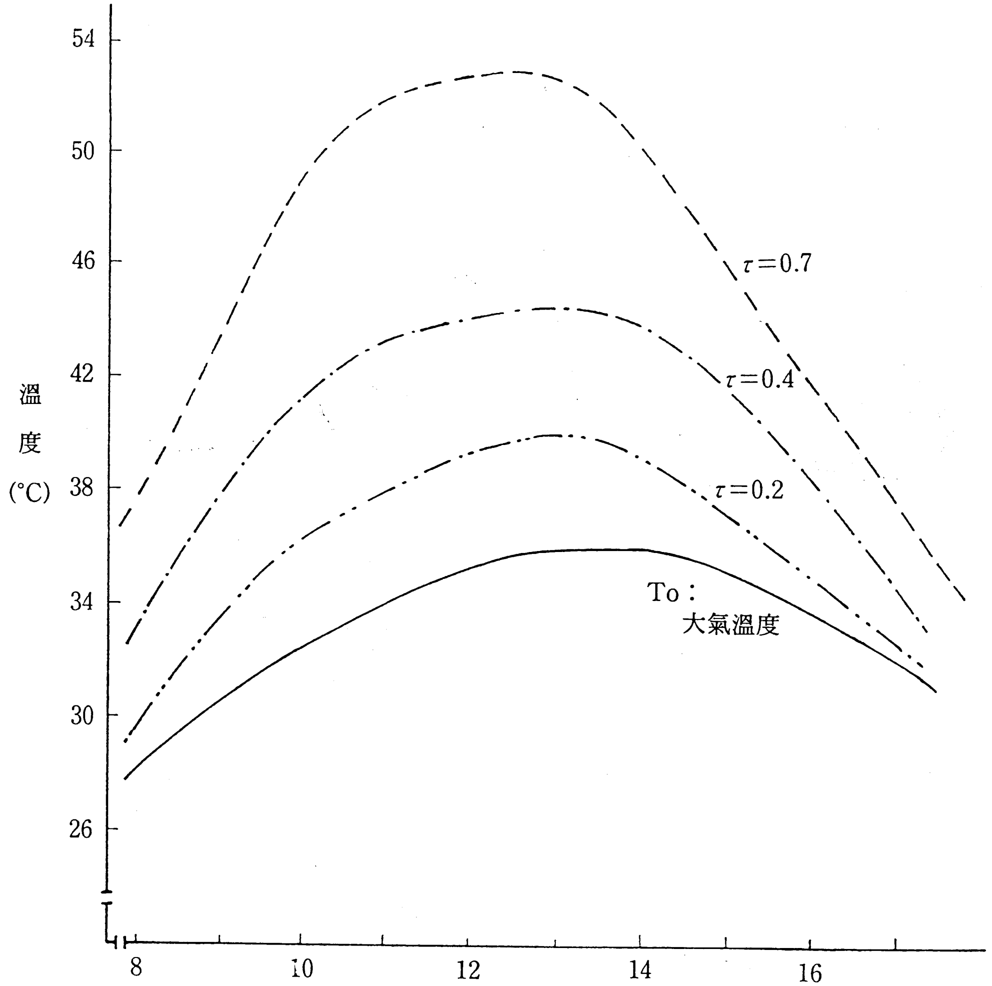

圖7. 高日照量時溫度之模式敏感性分析：遮蔭影響

Fig 7. The model sensitivity analysis for temperature in high solar intensity : shading effect.

在高日照量下，高太陽能穿透比例值（τ_e=0.7）時，各種通風效果之分析如圖8，溫室效應使溫室內部溫度（T_h）約增加20°C，在自然通風之情況下（兩側打開，與太子樓頂形成熱流通路，其溫度爲 T_n），溫室效應之影響則大爲減少，溫室內外溫度差約6～7°C。在械械通風最大通風最爲每分鐘1.2倍溫室體積時，溫度以 T_f 表示，溫室內部仍高於外界約3～4°C。若溫室其有冷水牆（Fan and Pad）或噴霧（Spraying）裝置以蒸發冷卻之作用加以降溫。（溫度 T_e），溫室內溫度僅略低於外界溫度。

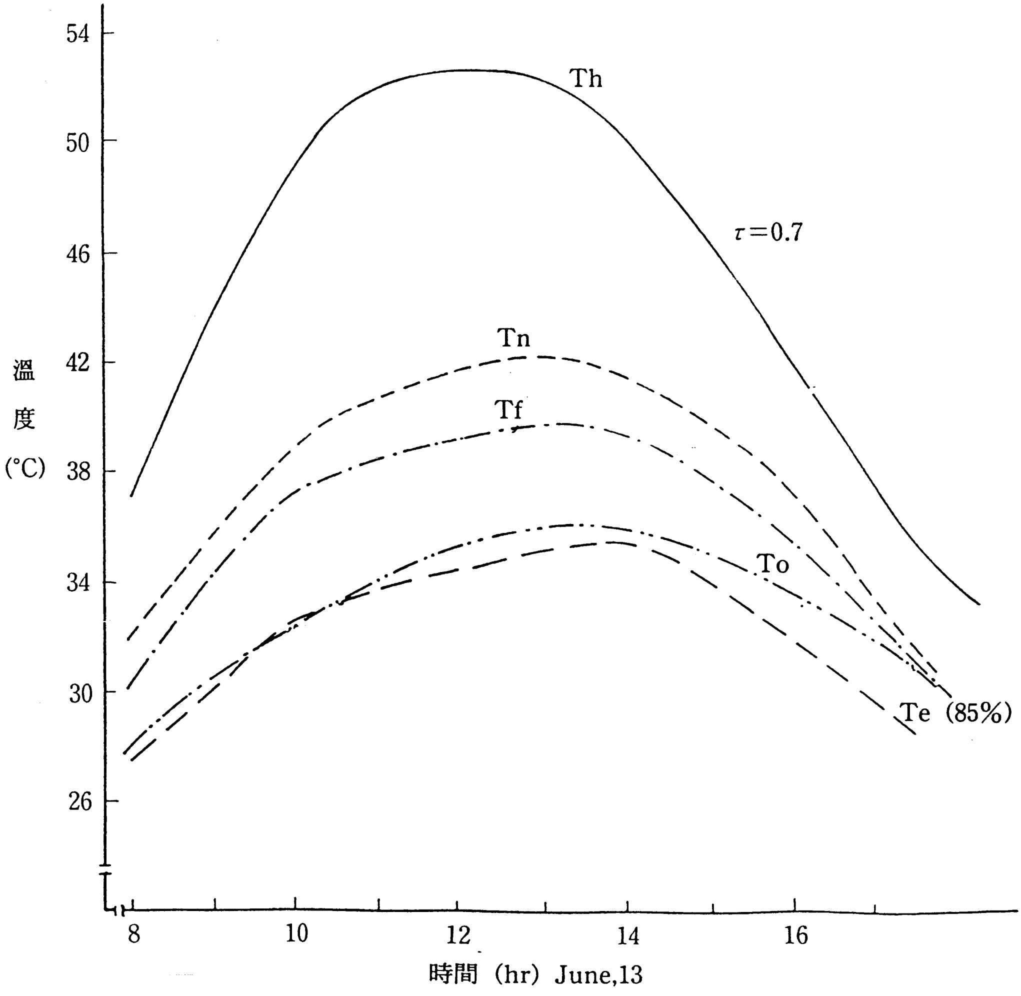

圖8. 高日照量時溫度之模式敏感性分析：高透光性之通風效果

Fig 8. The model sensitivity analysis for temperature in high solar intensity : Ventilation effect in high tramsmittance.

高日照但具有良好遮蔭裝置（τ_e＝0.2）時，各種通風效果之分析於圖9。溫室效應使溫室內溫度（T_n）高於外界約5～6°C。自然通風之情況下，溫室內溫度（T_f）與外界大氣溫差約2°C，機械通風時，利用每分鐘1.2倍，溫室體積通風量其效果可使溫室內部之溫度（T_f）與外界之差距小於1°C。蒸發冷卻作用在此情況下可發揮其降溫效果，在正午階段，可使溫室內溫度（T_e）低於外界約4～5°C。

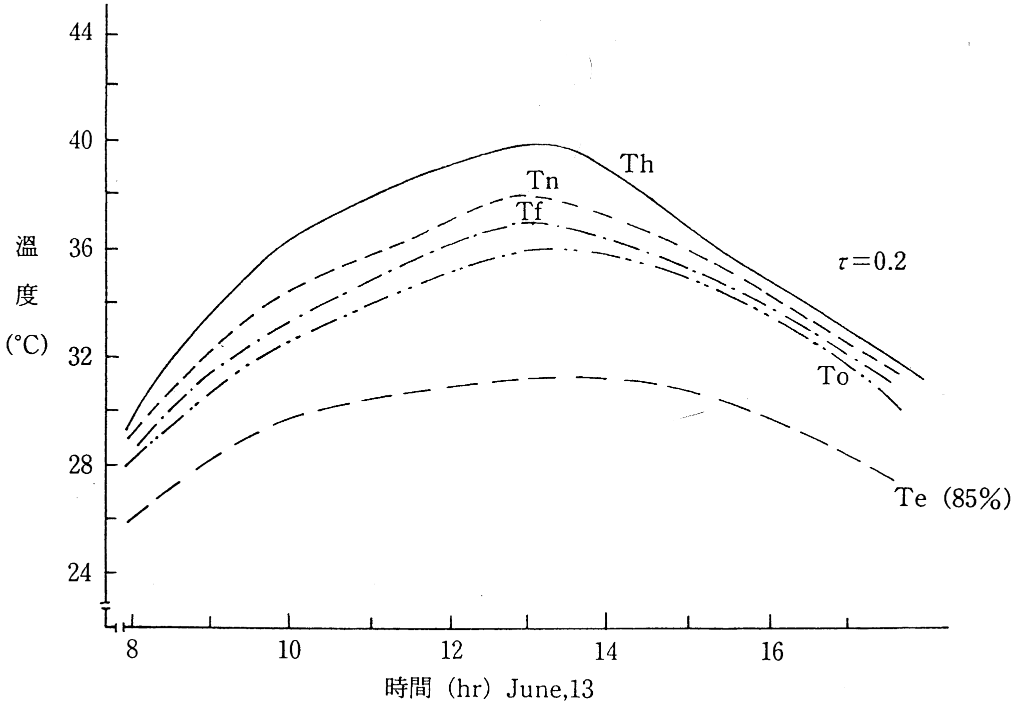

圖9. 高日照量時溫度之模式敏感性分析：低透光性之通風效果

Fig 9. The model sensitivity analysis for temperature in high solar intensity : Ventilation effect in low transmittance.

(二)低日照量

典型低日照量之天氣狀況如圖10所示。當日為多雲的陰天，日照量僅在正午期間超過400w/m²，其相對濕度值在75～90%左右，而溫度則於23～27°C之範圍。

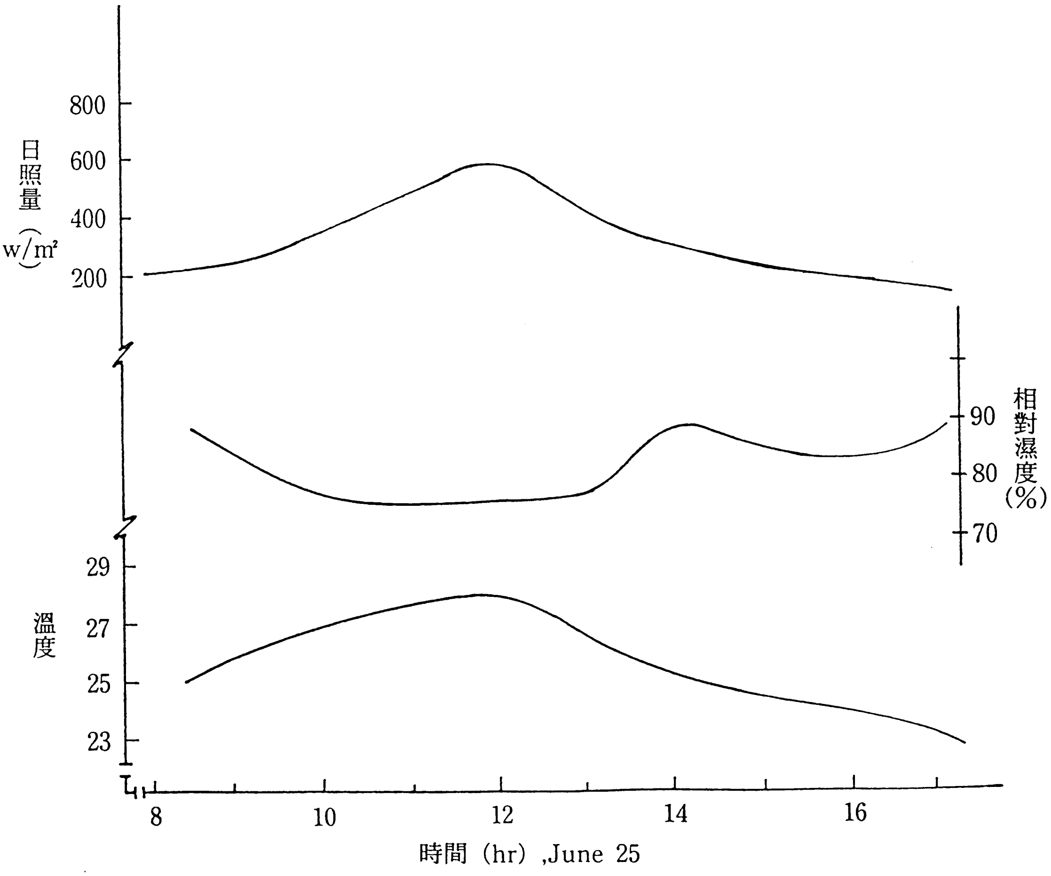

圖10. 典型之低日照量大氣環境

Fig 10. Typical air environment of low solar intensity.

在高日照能穿透性的狀況（$\tau_e=0.7$），溫室內溫度（T_n）值早晚大於外界溫度（T_o）約6°C，而在正午期間溫差最高約13°C，可知在低日照量時溫室效應仍不可忽視。自然通風可使室內溫室（T_n）大於外界約4°C，機械通風之溫度（T_f）則大於外界（T_o）2°C左右。值得注意的蒸發冷卻效果因處於高濕狀況，其降溫能力不良，出現大於外界溫度之結果。

相同大氣狀況下，在太陽能量穿透率爲0.4時，通風效果之比較如圖12。機械通風之效果使室內溫度（T_f）高於外界2°C左右。蒸發冷卻設備之作業效率於85%時，其有效降溫溫度略低於大氣溫度，但在55%之作業效率下，無法使室內溫度高於外界溫度。

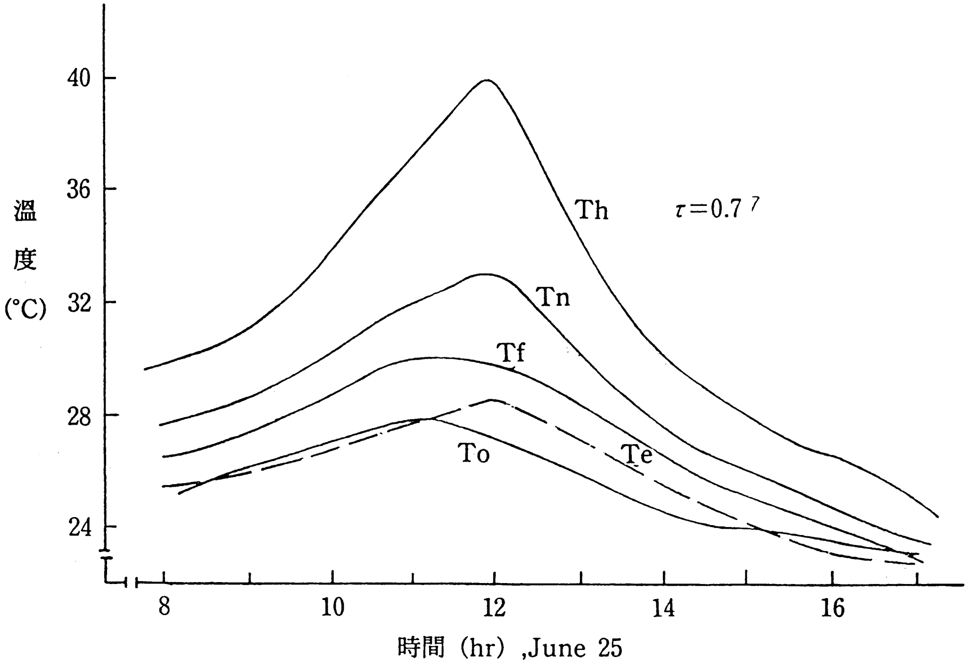

圖11. 低日照量時溫度之模式敏感性分析：通風效果

Fig 11. The model sensitivity analysis for temperature in low solar intensity : Ventilation effect

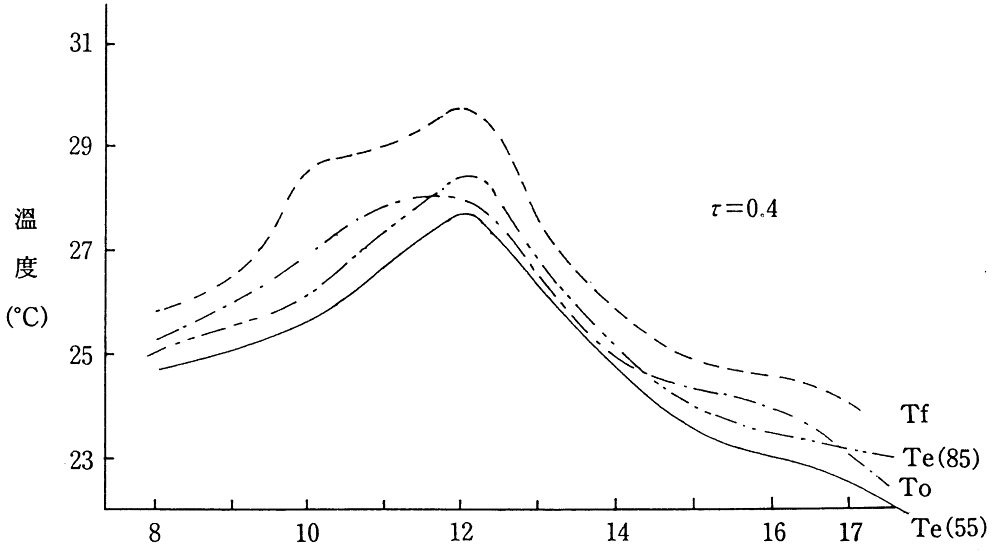

圖12. 高日照量時溫度之模式敏感性分析：蒸發冷卻效率之影響

Fig 12. The model sensitivity analysis for temperature in low solar intensity : Effect of evaportive cooling efficiency.

由上述兩種日照量之大氣環境，各種環控作業之分析得知，溫室內日照量對於溫度有顯著之影響，在高穿透性時，高日照時溫度效應約20°C，低日照量時亦有12°C之溫差，且在高日照能之狀況下蒸發冷卻設備並不能有效地降低溫室溫度，針對本省高日照能之作業環境，為能有效地避免溫室內出現熱累積現象，遮蔭設備為本省溫室環控必備之裝置，此結果亦可解釋本省玻璃溫室雖然具有精密環控設備而在夏季仍無法達到降溫之功能，玻璃溫室之設計係源自北緯度低日照量之國家，為求得到足夠之太陽能，其玻璃溫室設備，有大量之太陽能進入溫室內，而以蒸發冷卻設備所供應之冷風不足以完全排出熱累積量，因此降溫效果不良。此外，傳統所用冷水牆在高濕環境容易因生苔而降低工作效率，此更使降溫性能無法作用。

對於溫室內部之夏日降溫求，由敏感度分析得知必須在下列條件兼備時才能發揮作用(1)外界相對濕度低，(2)進入溫室內日照能之比例小，(3)蒸發冷卻裝置具有良好效率。因此以良好遮蔭裝置（遮蔭網的裝置）配合蒸發冷卻裝置的良好維護，在外界高溫低濕之下才能使其發揮效果，而其降溫效果在理論上不能低於當時之濕球溫度。

六、環控性能

在溫室環控作業中，利用自然通風，機械通風或蒸發冷卻設備都可以達到環境控制之目的。在昇溫之要求條件下，藉由溫室效應和加熱器即能控制溫室內部溫度之增加，且可以以環境模式加以預測，而在降溫的要求下，各種環控設備所能作用之降溫極限，以環境模式加以探討。

假設溫室之環境變化為即時反應，即其反應時間可以忽略，公式(5)d_{Ti}/d_{θ}值為零，此公式改寫為：

$$T_i=\frac{k_1+k_2\ T_o+k_3\ T_e}{k_2+k_3} \quad \cdots\cdots(17)$$

以能量之觀點而言，k1 指進入溫室內部轉化為內部空氣溫度增加之熱能，k_2 為四週週壁對外界熱傳與內部長波熱輻射損失之影響量。k_3 為通風作業之影響量。溫室環控作業之效果討論如下：

㈠溫室效應：

在密閉狀態下，k_3 值為零，溫室效應之溫度差為（T_i-T_o）值，自公式(16)可知，

$$\triangle T=T_i-T_o=k_1/k_2 \quad \cdots\cdots(18)$$

k_1/k_2之比值即為溫室內溫度所能增加值。

㈡自然通風

在自然通風時，進入溫室內部之空氣溫度（Te）等於大氣溫度（To），因此公式（17）可改寫為：

$$T_i=\frac{k_1}{k_2+k_3}+T_o \quad \cdots\cdots(19)$$

可知溫室內溫度將高於外界溫度，因 k_3 值大小有其限制，（k_2+k_3）與 k_1 值之比例可用以做為溫度調整之用。

㈢機械通風

在機械通風作業時，進入溫室內部之空氣溫度（T_e）值與 To 值相同，公式(19)可適用此情況，但因通風量增加；（k_2+k_3）值往往超過了 k_1 值，因此 $T_i\cong T_o$，即溫室內溫度可使接近外界溫度，換言之利用機械通風之降溫極限為與外界溫度相等。

㈣蒸發冷卻作業

在利用冷水牆或噴霧降溫作業，進入溫度內之空氣溫度（T_e）可計算如下：

$$T_e=T_d-E_f\ (T_d-T_w) \quad \cdots\cdots(20)$$

T_d, T_w 分別為大氣乾濕球溫度，E_f 為設備作業效率，公式(7)可改寫為：

$$T_1=\frac{k_1/k_3+k_2/k_3+T_e}{k_2/k_3+1} \cdots\cdots (21)$$

因此 T_1 值高於 T_e 值（由公式(20)可知 T_e 值可低於 T_o），其差異量由 k_1/k_3, k_2/k_3 之比值決定。

在 k_3 遠大於 k_1, k_2 之理想狀態，$T_1 \cong T_e$，即利用蒸發冷卻設備所能降溫之極限在於 T_e 值，而由公式(20)可知 T_e 值大於 T_w 值，換言之，其降溫極限無法低於當時之大氣濕球溫度值，而公式(20)與(21)之重要意義在於述明在無冷凍設備以機械能量移走溫室內熱能時，能使溫室內部溫度低於大氣溫度之最有效方式，在於此種蒸發冷卻環控方式。

七、未來研究之建議

由上述研究結果可知環境模式能夠準確地預測溫室內溫濕度的變化，且可用以進行溫室作業規量之用。但是此模式之成立條件基於許多假設，其中主要的假設在於溫室內部熱場與質場（水份）分佈爲均勻化，而在實驗中即以溫室中心點之量測值代表整個溫室之微氣候狀況，但在實地量測中，溫室上下各點溫度卻有差異性，此外在此研究中僅考慮溫室內部空氣之溫濕度，更深入之研究仍需執行。

(一)溫室內熱流、質流場之研究

溫室環控之目的在於提供植物生長之最佳環境，因此環控時植物生長部位（葉溫、根溫等）之微氣候控制成爲環控之主要目標。由於溫室之內部微氣候涉及了許多變數，以等位線方式描述其熱場與質場分佈對環控作業有極大之價值。利用有限差分法（Finite Dfference Method）或有限元素法（Finite Element Method），都可適用此種分析作業。

(二)溫室內植物，土壤溫度之研究

此模式中並未考慮植物葉溫，土壤溫度之影響性，在推廣研究中，應加入葉溫，土壤溫度之模擬分析項目，研究其溫度與溫室內氣溫之差異性。對於利用盆栽方式栽培之植物，更應包含盆栽介質溫度之研究。

(三)局部環控之研究

以實用之觀點，環控的範圍以植物生長最重要之部位爲主，例如育苗作業之根溫，花卉生長之生長點附近溫度……等，使用者已有在溫室內裝設各種局部環控之設施例如冬日在育苗盤上再覆蓋半圓隧道裝置以保溫。或夏季以冷水管通過育苗盤底部等方式以改良作物環境，此種局部環境之調整應加以量化爲環境模式之子模式，以合理規畫整體之環控需求。

(四)農業用感測系統之研究

溫室環境模式中所量測之大氣日照量、溫度、濕度，風向與風速等其量測值之性能顯著地影響了模式之準確性。因此適合農業環境所用之感測系統其感測元件之校正，雜訊之消除，長距離輸送之訊號不失眞……等技術均需要開發研究。

(五)環控策略之配合

環境模式在環控作業之最大價值在於環控策略之應用，在外在環境變化時，由環境模式之預測溫室內微氣候變化可用以進行前授式（Forward Type）控制，此在德國漢諾威大學已有實用技術可加以引用[2]。國內之環控技術可利用此研究得得環境模式配合前授式控制方式建立適用之環控技術。

(六)環境模式之推廣應用

此研究所建立之環境模式可修改其部份影響項目而適用於各型的農業設施，在作物生產所用設施方面，可修正使用於各類地面覆蓋（Mulch）與隧道型覆蓋（Tunnels）設施。在其他農業生產方面，可推廣應用於動物之生長環境如畜產，養蠶……等。

結　構

綜合以上研究結果所得結論如下：

一、此研究對溫室模式以兩型溫室進行驗證作業，結果顯示模式對於溫濕度的預測性能良好，溫度之準確性於2°C之內，相對濕度之準確性於5％以內。

二、自文獻所得之覆蓋材料傳導係數等參數值僅能提供參考，適用適用特定溫室之參數值必須藉由實地量測數據加以校正。

三、以環境模式之預測能力評估農民慣用夏季溫室地面部份積水之降溫作業，結果顯示在配合通風作業下才有降溫效果，但降溫之幅度不大。

四、溫室模式中溫度之反應時間快速，顯示假設條件中時間不相關性可以成立，但在連棟溫室之模式利用時應加以研究其適用性。

五、由模式敏感度分析可知日照量對溫室內環境影響性最大，在低日照量無遮蔭狀態下溫室效應仍然十分顯著，因此遮蔭設備爲國內溫室降溫必備之裝置。以蒸發冷卻設備進行降溫作業時必須配合以下條件：大氣之濕度低，進入溫室內日照量小與蒸發冷卻設備效率高。

六、自環境模式可知利用自然通風與機械通風以進行降溫之極限在於與外界大氣溫度相同，以蒸發冷卻設備降溫之極限必然大於大氣之濕球溫度。

參考文獻

1. 王鼎盛・1988・設施園藝設計手册・初版・臺北。
2. 陳加忠・1991・種苗生產與溫室栽培自動化研習報告・農試所。
3. 陳加忠，賴建洲，陳志昇，黃照明・1992・溫室環境模式之研究（一）數學模式分析・中華農業研究41(1)：79—89。
4. Akhter, P., G. E. Meyer and J. A. Deshazer. 1988. Dynamic simulation of greenhouse environment and thermal storage. ASAE Paper. No. 88—4526 St. Joseph, MI.
5 Albright, L. D. I. Seginer, L. S. Marsh and A. 0ko. 1985. In situ thermal calibration of unventilated greenhouse. J. Agric. Engng Res. 31：265—281.
6. Albright, L. D. 1991. Environment control for animals and plants. lst ed. ASAE.
7. Avissar, R. and Y. Mahrer. 1982. Verification study of a numerical greenhouse microclimate model. Trans. of ASAE. 25：1711—1720.
8. Chandra, P., L. D. Albright and N. R. Scott. 1981.A time dependent analysis of greenhouse thermal environment. Trans. of ASAE. 24：442—449.
9. Duncan, G. A.O. J. Loewer and D. G. Colliver. 1981.Simulation of energy flows in angreenhouse：Magnitudes and conservation potential. Trans. of ASAE. 24：1014—1021.
10. Froehlich, D. P., L. D. Albright, N. R. Scott and P. Chandra. 1979. Steady-periodic analysis of glasshouse thermal environment. Trans. of ASAE. 22：387—339.
11. Jones, P., J. W. Jones and Y. Hwang. 1990・Simulation for determining greenhouse temperature setpoints. Trans of ASAE：33(5)：1722—1728.
12. Kindelan, M. 1980. Dynamic modeling of greehouse environment. Trans. of ASAE. 23：1233—1239・
13. Takakura, T., K. A. Jordan and L. L. Boyd. 1971. Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. Trans. of ASAE. 14：964—971.
14. Walker, J. N., R. A. Aldrich and T. H. Short. 1983. Quantity of air flow for greenhouse structures. In "Ventilation of agricultural structures", ed. M. A. Hellickson and J. N. Walker, P. 257 | 277. ASAE.
15. 堀部和雄・1990・乾燥ハウえの集熱特性（第二報）農業機械學會誌・52(5)：51—57.

The Studies of the Greenhouse Environmental Model Part II. Verification and Application of Model[1]

C. C. Chen, C. C. Lai[2], C. S. Chen[3] and C. M. Huang[2]

Summary

In order to verify the accuracy and flexidility of the greenhouse environmental model, amount of data of microclimate for two type plastic greenhouses were collected at various conditions. Some of data were used to calibrate the numerical values of model parameters because those values from several literatures were different singificantly. Most of the measurement data were adopted to check the predictive ability of this model. The accuracy of the predicted temperature was nearly 2°C. The deviations of relative humidity were within 5%. The assumption of time-depentent for this model was valid. Numerical experiments were conducted to test the sensitivity of the model to some parameters. The results indicate the shading equipment is the essential device for the local greenhouse. The cooling ability of evaporating cooling method depends on the quantities of the solar energy transmitting into greenhouse, the relative humidity of the outside air and the operating efficiency of evaporating device. The limitation of the cooling temperature in greenhouse is equaled to the dry-bulb temperature of outside air for natural and mechanical ventilation, and the wet-bulb temperature for evaporating cooling.

Key words : Greenhouse, Model Verification

---

1. Contribution No. 1612 from Taiwan Agricultural Research Institute.

2. Associate researcher, Assistant researcher and Researcher assistant, Depart. of Agricultural Engineering.
3. Assistant. Office of Earm Management. TARI, Taichung, Taiwan.